

## 공기 주입에 따른 프란시스 수차 모델의 흡출관 내 유동 특성

김승준\* · 조용\*\* · 최종웅\*\* · 현정재\*\* · 김선우\*\* · 김진혁\*,\*\*\*†

### Flow Characteristics according to the Air-injection in the Draft Tube of a Francis Turbine Model

Seung-Jun Kim\*, Yong Cho\*\*, Jong-Woong Choi\*\*, Jung-Jae Hyun\*\*,  
Sun-Woo Kim\*\*, Jin-Hyuk Kim\*,\*\*\*†

Key Words : Francis turbine(프란시스 수차), Draft tube(흡출관), Air-injection(공기 주입), Internal flow characteristics(내부 유동 특성), Numerical analysis(수치해석적 분석)

#### ABSTRACT

Undesirable pressure fluctuations in Francis turbines are caused by precession of the vortex rope in the draft tube under conditions of low flow rate. These pressure fluctuations can cause a resonance that seriously undermines the stability of the turbine system. In the previous study, the effects of anti-swirl fins in the draft tube were investigated to suppress the vortex rope. However, despite the installation of anti-swirl fins, the precession of vortex rope is occurred near the draft tube cone, and an additional suppression factor for vortex rope is required. Therefore, this preliminary study investigates the effect of air-injection to select flow rate of the air-injection for suppressing the vortex rope in the draft tube cone. Three-dimensional steady-state Reynolds-averaged Navier-Stokes analyses were conducted with a shear stress transport turbulence model to investigate the performance and internal flow characteristics according to the flow rate of air-injection. The efficiencies were decreased by the air-injection into the draft tube, however, the effect of vortex rope suppression was exhibited when the flow rate of air-injection was above 0.5%Q.

#### 1. 서 론

화석 에너지 시스템의 수명이 다해가고 있으며, 우리나라의 경우 화석 에너지 자원이 매우 부족하고 높은 해외 의존도로 인하여, 이를 경감시키고 대체할 에너지원의 개발과 필요성이 대두되고 있다. 신재생 에너지원의 개발은 정부의 에너지정책에 따라 신재생에너지의 발전량 확대로 2030년 기준 신재생발전 설비용량은 60GW 수준으로 확대될 전망이다. 특히, 예측 및 출력 불확실성이 큰 변동성 재생에너지인 태양광 및 풍력발전의 설비용량은 51GW 수준으로 확대 보급될 것으로 전망된다. 그러나 변동성 재생에너지는 기상 조

건에 따라 발전량이 불규칙적이며, 발전 출력을 예측하기 어려울뿐더러 출력의 변화폭이 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 변동성 재생에너지가 전력계통에 투입될 경우, 전력수급 균형을 유지하기 위한 전력계통의 유연성을 저해하게 된다.<sup>(1,2)</sup>

한편, 전력계통의 유연성 제공을 위해 높은 출력 증·감발량 특성을 가진 수력 발전은 계통 안정 및 주파수 조정에 기여하고 있으며, 그 역할이 대두되고 있다. 따라서 수력 발전은 통상 전력 수요가 높은 시간에 발전을 통해 피크 부하를 담당하여 전기 에너지를 공급하는 역할이 아닌 유연성 제공 역할에 따른 운전 환경의 변화로 탈설계 영역 내 운전이 지속되고 있다. 특히, 저유량 운전 영역에서는 유로 내 복잡한

\* 한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부 (Clean Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

\*\* 한국수자원공사 K-water 연구원 (K-water Institute, Korea Water Resource Corporation)

\*\*\* 과학기술연합대학원대학교 생산기술(청정공정·에너지시스템공학)전공 (Industrial Technology(Green Process and Energy System Engineering), Korea University of Science & Technology)

† 교신저자, E-mail : jinhyuk@kitech.re.kr

유동이 발생하며 진동 및 소음이 유발되어 수차 발전 시스템의 운전을 불안정하게 한다. 이와 같은 수차의 불안정한 운전 환경은 잦은 고장 발생의 원인이 되며, 시스템의 비정상적 등 수차 발전 시스템의 수명감소로 이어질 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

수차 발전에 적용되는 프란시스 수차는 저유량 영역 운전 시 흡출관(Draft tube) 내 와류의 세차 운동(Precession of vortex rope)이 유발되며, 세차 와류는 흡출관 내 러너 콘의 중심선 축으로 그 둘레를 회전하며 발생하는 와류로, 러너 회전 주파수의 약 0.2~0.4배의 주파수 특성을 나타낸다.<sup>(5)</sup> 이는 압력 맥동 유발의 원인으로 수차 발전 시스템과 공진을 일으키는 경우, 토크와 출력 맥동을 유발시켜 수차 성능 저하의 원인이 된다. 본 연구진의 이전 연구를 통해 흡출관 내 세차 와류 억제를 위해 흡출관 벽면의 안티-스월핀(Anti-Swirl fins)의 적용에 따른 유동 내 스월 성분의 감소를 통한 와류 발생 억제 특성이 검토된 바 있다. 하지만, 안티-스월핀의 적용에도 불구하고 흡출관의 콘 인근에는 세차 와류가 발생하며, 이에 대한 추가적인 와류 억제가 필요하다.<sup>(3)</sup>

프란시스 수차의 흡출관 내 물의 포화 압력 보다 저압구간에서 발생하는 와류의 억제를 위해 공기 또는 물을 주입하여 부분 압력 증가시키는 방식을 사용하고 있으며, 이에 대한 관련 연구로서, Chirkov 등<sup>(6)</sup>은 프란시스 수차 대유량 운전 조건에서 발생하는 흡출관 내 와류 억제를 위해 러너 콘으로

부터 공기를 주입하여 이에 대한 수차의 성능 및 압력 맥동 특성을 수치해석적으로 분석하였다. Yu 등<sup>(7)</sup>은 수치해석적 분석을 통해 프란시스 수차의 저유량 운전 조건에서 주축 중심을 통한 공기 주입에 따른 흡출관 내 와류 및 압력 맥동 완화에 대한 특성을 검토하였다. Li 등<sup>(8)</sup>은 프란시스 수차의 저유량 운전 조건에서 흡출관 내 유동 디플렉터의 설치와 물과 공기 주입에 따른 압력 맥동 특성을 수치해석을 통해 분석하였으며, 실험 결과와 타당성 검토를 통하여 결과의 신뢰성을 확인하였다. 이와 같이 프란시스 수차의 흡출관 내 발생하는 와류의 억제를 위해 공기 또는 물 주입에 관한 다양한 연구가 수행되고 있지만, 프란시스 수차의 흡출관 내 안티-스월핀이 적용된 형상 조건에서 저유량 운전 조건 시 발생하는 세차 와류에 대해 공기 주입에 따른 억제 특성에 대해서는 체계적인 연구가 수행되고 있지 않다.

본 연구에서는 흡출관 내 안티-스월핀의 적용에도 흡출관 콘 인근에 남아있는 세차 와류에 대해 러너 콘으로부터 공기 주입을 통한 와류 억제 특성 검토 및 주입 유량 선정을 위한 사전연구로서, 물, 증기 및 공기를 고려한 3상 유동 삼차원 정상 상태 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 해석을 수행하였다. 흡출관 내 형성되는 와류에 대해 다른 공기 주입 유량에 대한 프란시스 수차 모델의 성능 및 내부 유동 특성을 규명하고자 하였다.

## 2. 프란시스 수차 모델 제원 및 공기 주입

프란시스 수차 모델의 흡출관 내 공기 주입에 따른 내부 유동 분석 및 공기 주입 유량 선정을 위해, 본 연구진에 의해 이전 연구에서 수행된 직경 350mm 및 비속도 270급 프란시스 수차 모델을 해당 연구의 기본 모델로 선정하였으며, 흡출관 내 저유량 운전 조건에서 와류가 가장 크게 발생한 가이드 베인 각도 16° 조건에 대하여 삼차원 수치해석을 수행하였다.<sup>(3)</sup> Fig. 1에 프란시스 수차 모델의 삼차원 형상 및 흡출관의 공기 주입 입구를 나타냈으며, 상세 제원인 비속도, 유량, 에너지 및 회전속도는 IEC 60193 규격에 제시된 계수를 통해 Table 1과 같이 나타냈다.<sup>(9)</sup>

흡출관 내 공기 주입 유량은 관련 연구들의 주입 유량을 참고하여 프란시스 수차 모델의 전체 유량에 대해 0.1%Q, 0.5%Q 및 1.0%Q (Q는 전체 유량)의 유량의 공기를 흡출관으로 주입하여 성능 및 내부 유동 특성을 비교 분석하고자 하였다.<sup>(6-8)</sup>

## 3. 수치해석 기법

본 연구에서는 프란시스 수차 모델의 삼차원 내부 유동장에 대한 정상 상태 RANS 수치해석 수행을 위해, 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-19.1을 사용하였으며, 유한체적법(Finite

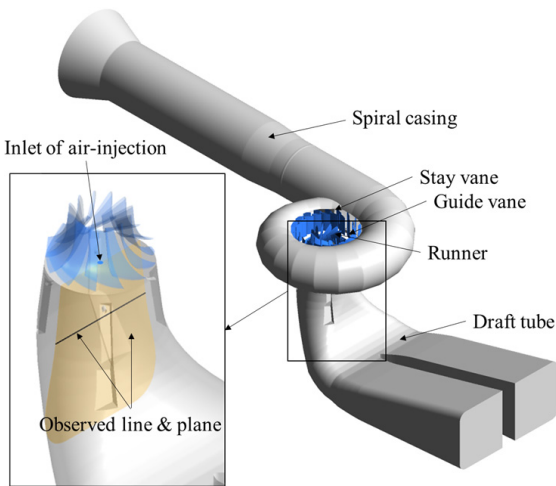


Fig. 1 3D model of draft tube with inlet of air-injection in a Francis turbine model

Table 1 Specifications of a Francis turbine model

Specifications	Values
Specific speed, $N_s$	270
Discharge factor, $Q_{ED}$	0.33
Energy coefficient, $E_{nD}$	4.35
Speed factor, $n_{ED}$	0.48
Runner outlet diameter, $D_2$	0.35 m

Volume Method, FVM)으로 이산화된 지배방정식을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 프란시스 수차 모델 유동 도메인의 격자 생성을 위해 Turbo-grid, ANSYS Meshing 및 ICEM-CFD를 사용하였으며, 해석을 위한 경계조건은 CFX-Pre를 사용하였다. 유동 해석의 계산 및 결과 분석은 각각 CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.

Fig. 2는 프란시스 수차 모델의 격자 구성을 나타내며, 러너, 가이드 베인 및 스테이 베인은 육면체 격자(Hexahedral grid)로 작성되었으며, 스파이럴 케이싱 및 흡출관은 사면체 격자(Tetrahedral grid)로 작성되었다. 러너 블레이드 표면에는 O형 격자계를 사용하여 첫 번째 격자점에서  $y^+ \leq 5$ 를 유지하도록 하였다. 프란시스 수차 모델의 격자 작성은 본 연구진에 의해 이전 연구에서 수행된 GCI(Grid Convergence Index) 기법을 사통해 격자 수 총  $14.74 \times 10^6$ 에 대해 효율에 대한  $GCI_{fine}^{21}$  값을 약 0.22%의 매우 낮은 이산화 오류 값으로 계산하여 격자 작성을 수행하였으며, Table 2와 같다.<sup>(11~14)</sup>

수치해석의 경계조건으로는 입구 및 출구는 각각 상부 저수지와 하부 저수지의 수위를 고려한 전압력 및 정압력 조건

을 부여하였고, 작동 유체는 25°C의 물과 증기를 사용하였으며, 흡출관에 대한 공기 주입은 25°C의 공기를 사용하여 해석을 수행하였다. 회전자인 러너와 고정자인 가이드 베인 및 흡출관의 경계면 조건은 경계면을 통해 원주방향으로 평균된 유동값을 입력하는 Stage-average 방식을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 난류 모델은 유동박리에 대해 정확한 예측을 나타내며, 벽면 근처 영역에서 정확한 해석 결과를 나타내는 SST (Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다.<sup>(15,16)</sup>

## 4. 결 과

### 4.1 수치해석 결과 타당성 및 성능 검토

정상 상태 RANS 수치해석 결과에 대한 타당성을 검토하기 위해 프란시스 수차 모델의 성능 시험 결과와 Fig. 3과 같이 효율을 비교하였으며, 효율은 성능 시험 결과의 최고 효율값으로 무차원화 하였다. 모델 수차의 성능 시험 결과는 한국수자원공사에서 제공한 모델수차 정밀 성능 시험 결과를 사용하였고, 모델 성능 시험에서 IEC 60193 규격에 제시

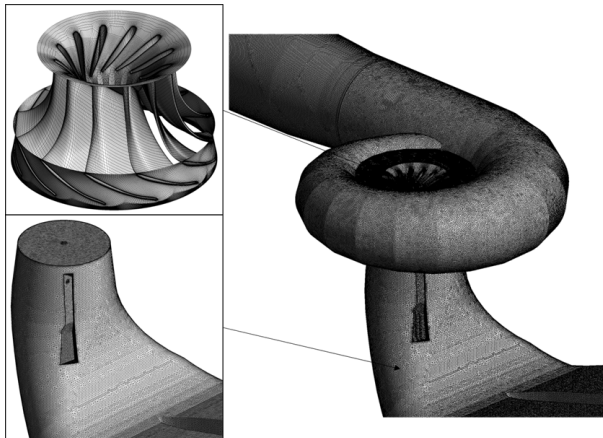


Fig. 2 Constructed numerical grids of a Francis turbine model

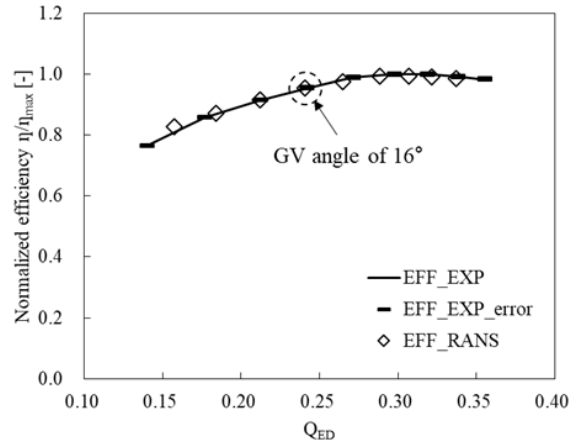


Fig. 3 Validation test with RANS and experimental results of a Francis turbine model

Table 2 Calculation of discretization error for efficiency of a Francis turbine model

	$\phi = \text{Efficiency}$
$N_1, N_2, N_3$	$14.74 \times 10^6, 7.05 \times 10^6, 3.59 \times 10^6$
$r_{21}$	1.28
$r_{32}$	1.25
$\phi_1$	1
$\phi_2$	0.9952
$\phi_3$	0.9808
$p$	5.20
$GCI_{fine}^{21}$	0.22%

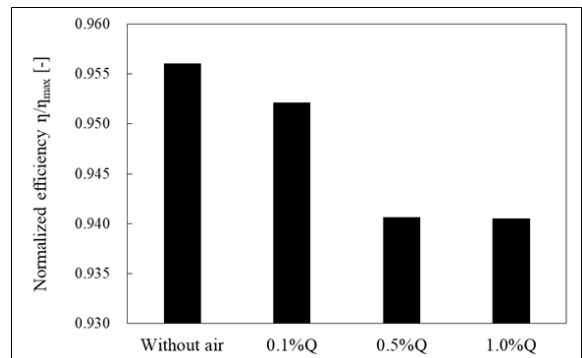


Fig. 4 Comparison of efficiency according to flow rate of air-injection in a Francis turbine model

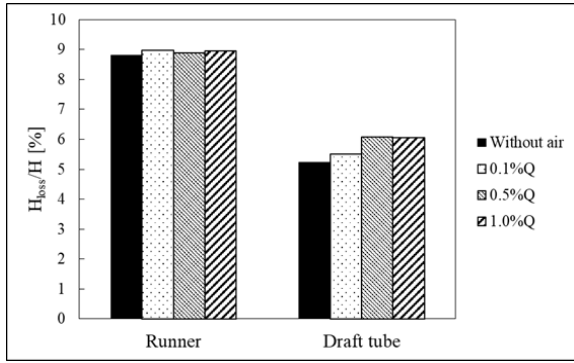


Fig. 5 Head loss distributions according to flow rate of air-injection at runner and draft tube of a Francis turbine model

된 시스템 불확도( $f_s$ ) 및 우연 불확도( $f_r$ )를 고려한 총 불확도( $f_i$ )는  $\pm 0.245\%$  계산되었으며 아래 식과 같다.<sup>(9, 17)</sup>

$$f_i = \pm [(f_s)^2 + (f_r)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

모델 수차의 수치해석 및 성능 시험 결과가 유량에 따라 효율의 경향이 전반적으로 잘 일치하였으며, 특히 관찰된 가이드 베인 각도  $16^\circ$ 에서의 결과가 잘 일치하여 본 연구의 수치해석 결과에 대한 타당성을 확인할 수 있었다.

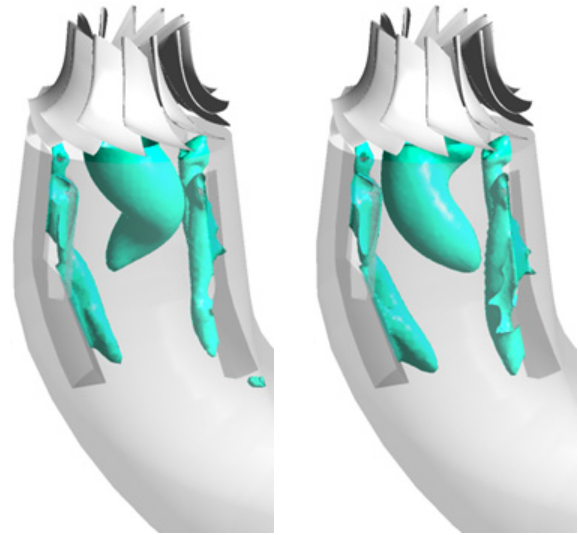
Fig. 4는 관찰된 가이드 베인 각도  $16^\circ$  조건에서 흡출관 내 공기 주입 유량에 따른 효율을 비교하였다. 흡출관 내 공기 주입 및 주입 유량이 증가함에 따라 효율은 감소하는 특성을 나타냈다. 반면, 공기 주입 유량  $0.5\%Q$  및  $1.0\%Q$ 에서는 유사한 효율 감소 특성을 나타냈다.

흡출관 내 공기 주입 유량에 따른 프란시스 수차 모델의 성능 특성 검토를 위해 Fig. 5와 같이 러너 및 흡출관에서 Head 손실을 계산하였다. 러너 및 흡출관의 Head 손실은 각각 식 (2) 및 (3)을 사용하여 계산하였다.

$$H_{loss(runner)} = \frac{\Delta p_{total} - \frac{T\omega}{Q}}{\rho g} \quad (2)$$

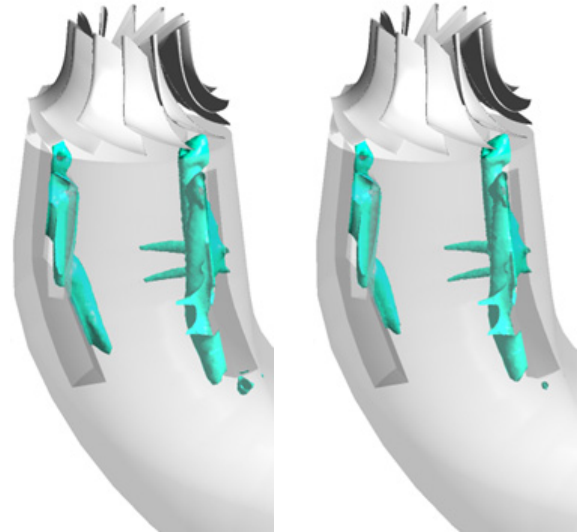
$$H_{loss} = \frac{\Delta p_{total}}{\rho g} \quad (3)$$

여기서  $\Delta p$ ,  $T$ ,  $\omega$ ,  $Q$ ,  $\rho$  및  $g$ 는 수차 구성요소의 전압력 차, 러너의 토크, 각속도, 유량, 물의 밀도 및 중력 가속도를 나타낸다. 흡출관 내 공기 주입 유량에 따라 러너에서의 Head 손실은 유사하게 나타나며, 흡출관에서는 공기 주입 유량에 따라 손실이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 공기 주입 유량  $0.5\%Q$  및  $1.0\%Q$ 의 흡출관에서 Head 손실이 유사하게 나타나는데 이를 통해 Fig. 4의 유사한 효율 특성에 대한 원인으로 볼 수 있다.



(a) Without air-injection

(b) 0.1%Q air-injection



(c) 0.5%Q air-injection

(d) 1.0%Q air-injection

Fig. 6 Iso-surface distributions of pressure according to flow rate of air-injection in draft tube of a Francis turbine model

#### 4.2 공기 주입에 따른 내부 유동장 분석

흡출관 내 공기 주입 유량에 따른 내부 유동 특성 분석을 위해 Fig. 6과 같이 흡출관 내 Iso-surface 압력 분포를 검토하였으며, 압력값은 프란시스 수차 모델의 출구 압력을 고려한 물의 포화압력을 나타냈다. Fig. 6(a)의 공기 주입이 없는 조건에서는 흡출관 내 안티-스월핀이 장착되었음에도 불구하고 흡출관 콘 인근에서 발생한 와류가 볼 수 있으며, 공기 주입 유량  $0.1\%Q$ 에서는 흡출관 내 와류 억제 효과를 나타내지 않았다. Fig. 6(c) 및 (d)의 공기 주입 유량  $0.5\%Q$  및  $1.0\%Q$ 에서는 흡출관 내 와류 발생의 억제 효과를 나타냈으며, 저유량 영역에서 흡출관 내 강한 스월 성분으로 인한 안

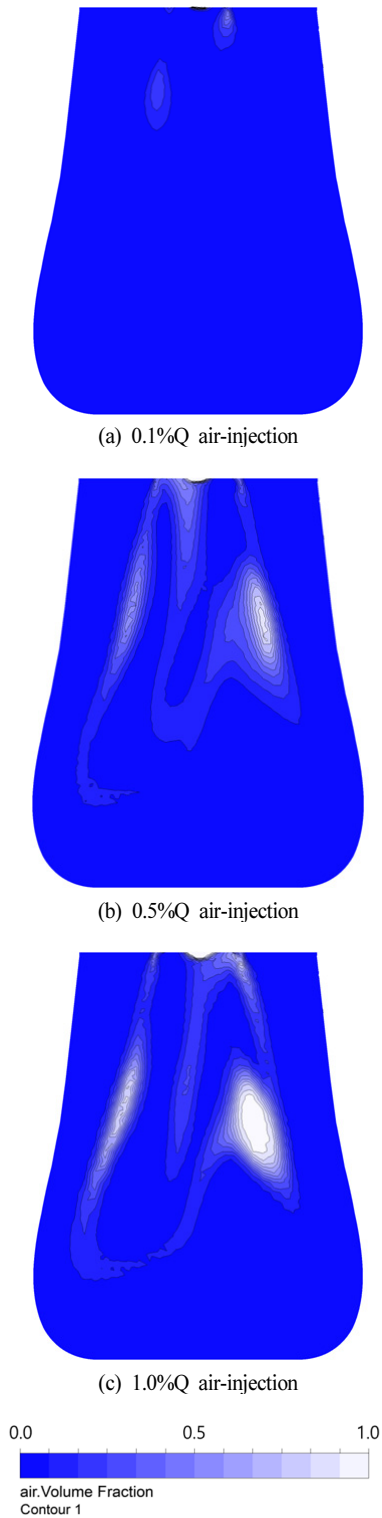


Fig. 7 Air volume fraction distribution according to flow rate of air-injection in draft tube of a Francis turbine model

티-스웰핀 인근에서의 저압 영역의 발생만 나타냈다.

Fig. 7은 프란시스 수차 모델의 흡출관 내 공기 주입 유량에 따라 주입되는 공기의 특성을 확인하기 위해 Fig. 1에 나타낸 관찰평면 위에서 air volume fraction을 검토하였다. 공기 주입 유량 0.1%Q는 상대적으로 적은 유량으로 흡출관

내 분포를 거의 나타내지 않았고, 0.5%Q 및 1.0%Q는 유사한 분포를 나타냈으며, 유량에 따른 다른 용적분율을 나타냈다. 이와 같이 공기 주입 유량에 따라 흡출관 내 물의 포화 압력 아래로 감소하는 영역에 대해 압력 증가 효과가 나타나므로, Fig. 6의 공기 주입 유량에 따른 흡출관 내 와류 억제에 대한 특성을 확인할 수 있다.

흡출관 내 공기 주입 유량에 따른 속도에 대한 유선 분포를 Fig. 8과 같이 나타냈다. Fig. 8(a)의 공기 주입이 없는 경우에는 Fig. 6(a)에서 나타낸 흡출관 내 와류의 발생으로 유선의 회전 특성이 관찰되며, 공기 주입 유량 0.1%Q에서는 공기 주입에 대한 와류 억제에 대한 효과가 없어, 공기 주입이 없는 경우와 유사하게 흡출관 내 유선의 회전을 나타냈다. 반면, 공기 주입 유량 0.5%Q 및 1.0%Q에서는 축 방향으로의 공기 주입의 영향으로 인해, 흡출관 내 유동에 영향을 주어 공기 주입 방향의 유선이 관찰되었으며, 이와 같은 공기 주입 효과로 인해 흡출관 콘 인근에 발생하는 와류의 억제 효과를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 9는 흡출관 내 공기 주입 유량에 따른 압력 분포를 Fig. 1의 관찰 평면 위에 나타냈다. 공기 주입이 없는 경우에는 흡출관 내 와류 발생으로 인한 저압 영역이 관찰되었으며, 공기 주입 유량 0.1%Q에서도 공기 주입에 대한 억제 특성에 큰 영향 없이 저압 영역이 유사하게 발생하였다. 공기주입 유량 0.5%Q 및 1.0%Q에서는 공기 주입에 대한 와류억제 효과로 인하여 흡출관 내 저압 영역이 해소됨을 볼 수 있다.

Fig. 10은 흡출관 입구로부터 0.6D<sub>2</sub>의 관찰선(Fig. 1) 위치에서 축 방향 및 원주방향 속도 분포를 공기 주입 유량에 따라 비교하였다. Fig. 10(a)에서 흡출관 내로 공기가 주입됨에 따라 축 방향 속도의 역류 발생의 범위가 증가하였으며, 공기 주입 유량 0.5% 및 1.0%에서는 유사한 속도 분포를 나타냈다. 이와 같은 축 방향 속도의 역류 발생 범위의 증가를 볼 때, 공기 주입 유량이 증가함에 따라 흡출관의 Head 손실 증가 및 성능 감소의 원인으로 볼 수 있다. Fig. 10(b)의 원주 방향 속도 분포에서 공기 주입이 없는 경우와 0.1%Q의 공기 주입 유량에서 발생 위치는 다르지만 유사한 최대 원주 속도 값을 나타냈으며, 공기 주입 유량이 증가함에 따라 와류의 억제와 같이 최대 원주 속도가 감소하였다. 또한, 원주 방향 속도에서도 공기 주입 유량 0.5%Q 및 1.0%Q는 유사한 속도 분포를 나타냈다.

와류 발생의 원인이 되는 흡출관 내 스웰 강도의 검토를 위해 스웰 수, S(Swirl number)를 식 (4)를 통해 계산하였으며, Fig. 1에 나타낸 관찰선(0.6D<sub>2</sub>)에서 공기 주입 유량에 따라 스웰 수를 Fig. 11과 같이 나타냈다.

$$S = \frac{\int_0^R C_m \cdot C_u \cdot r^2 \cdot dr}{R \int_0^R C_m^2 \cdot r \cdot dr} \quad (4)$$



공기 주입에 따른 프란시스 수차 모델의 흡출관 내 유동 특성

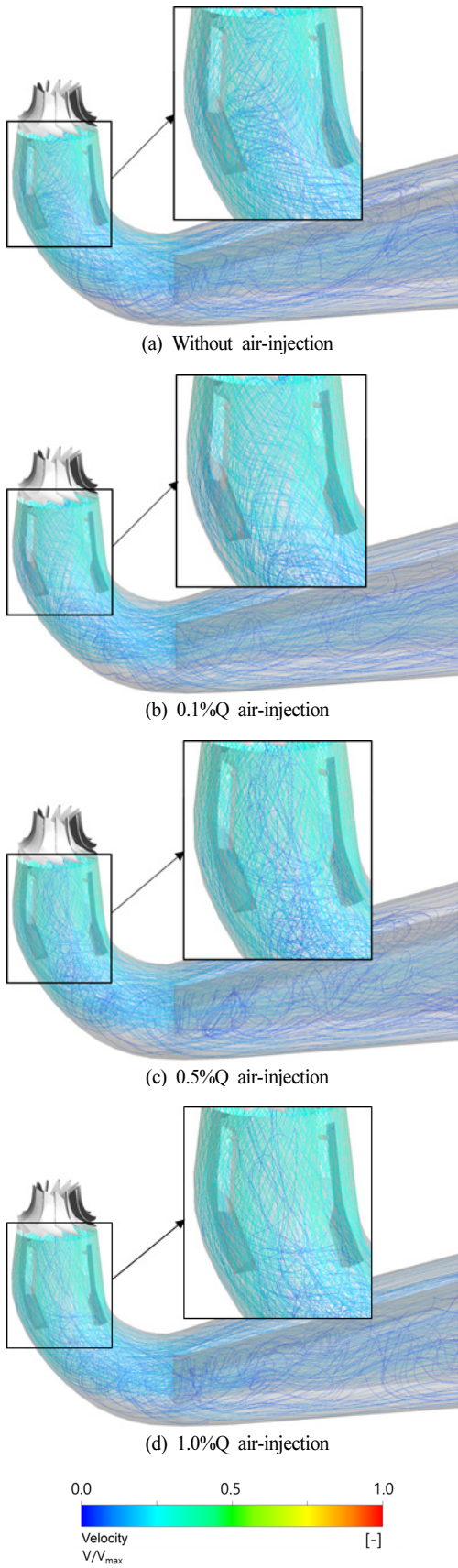


Fig. 8 Streamline distribution of velocity according to flow rate of air-injection in a Francis turbine model

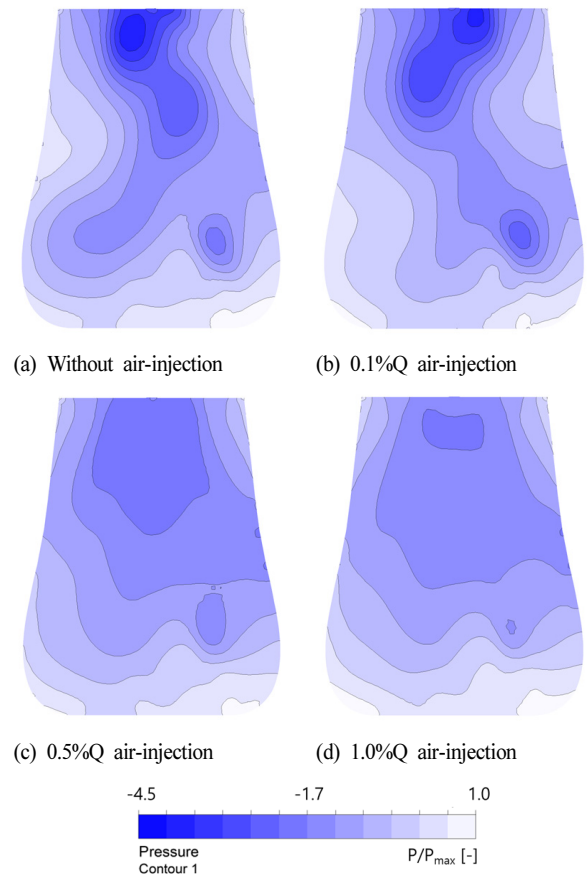


Fig. 9 Pressure distribution according to flow rate of air-injection in draft tube of a Francis turbine model

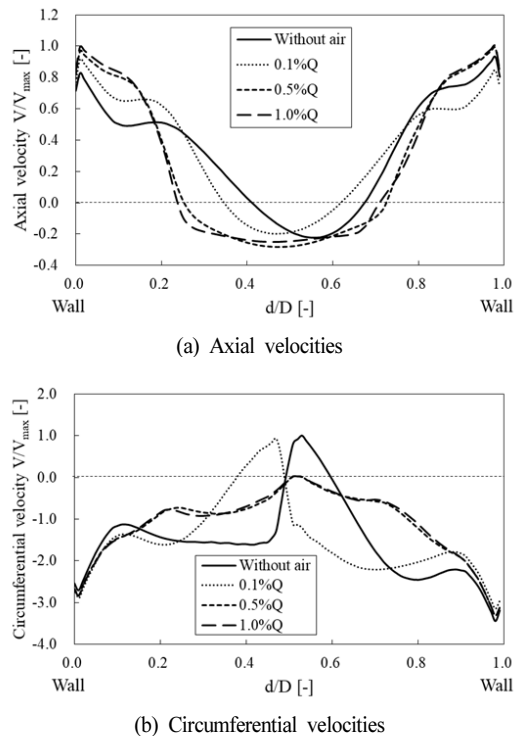


Fig. 10 Axial and circumferential velocity distribution on observed line according to flow rate of air-injection

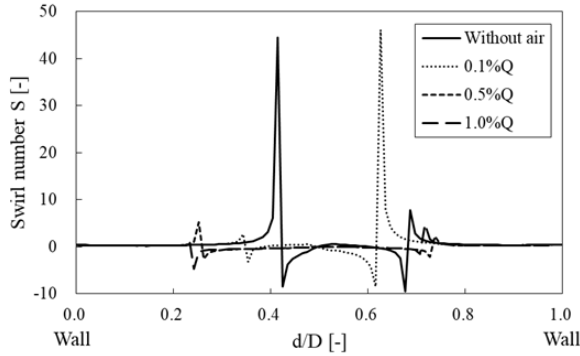


Fig. 11 Swirl number distribution according to flow rate of air-injection in darft tube

여기서  $C_m$  및  $C_u$ 는 각각 축 방향 및 원주방향 속도를 의미한다. 공기 주입이 없는 경우에는 흡출관 중심 인근으로 갈수록 높은 스윙 수를 나타냈으며, 공기 주입 유량 0.1%Q에서는 와류의 억제 효과가 없어 Fig. 10(b)의 원주 방향 속도 분포와 유사하게 발생 위치는 다르지만 높은 스윙 수를 나타냈다. 공기 주입 유량이 0.5%Q 및 1.0%로 증가함에 따라 스윙 수가 감소하며 최곳값 발생 위치가 흡출관 중심 인근에서 벽면으로 이동하는 특성을 나타냈다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 프란시스 수차 모델의 저유량 영역 운전 시 흡출관 내 안티-스윙핀의 적용에도 남아있는 와류에 대해, 러너 콘으로부터 공기 주입에 대한 와류 억제 특성 검토 및 주입 유량 선정을 위한 사전 연구로서, 공기 주입 유량에 따른 성능 및 내부 유동 특성을 규명하고자 정상 상태 RANS 수치해석을 수행하였다. 수차 모델의 전체 유량에 대해 공기 주입 유량 0.1%Q, 0.5%Q 및 1.0%Q를 적용하여 성능 및 내부 유동을 비교 및 검토하였다. 공기 주입 유량이 증가함에 따라 Head 손실 증가 및 성능은 감소하였으며, 0.5%Q 및 1.0%Q 조건에서는 성능 감소가 유사하게 발생함을 확인하였다. Iso-surface 압력 분포, 유선 속도 분포 및 압력 분포의 검토를 통하여 공기 주입 유량 0.1%Q는 상대적으로 흡출관 내 와류 억제에 대한 효과를 나타내지 못함을 확인하였으며, 공기 주입 유량 0.5%Q 및 1.0%Q에서는 와류에 대한 억제 특성을 나타냈으며, 유사한 내부 유동 특성을 나타냈다. 또한, 공기 주입으로 인해 흡출관 내 축 방향 속도 분포에서 역류 특성 증가와 원주 방향 최대 속도의 감소를 확인하였으며, 이를 통해 공기 주입에 따른 수차 모델의 성능 감소의 원인 및 와류 억제 특성을 확인할 수 있었다. 또한, 흡출관 내 공기 주입에 따른 스윙 수를 통해 공기 주입을 통하여 와류 억제 효과를 나타내었을 때 최대 스윙 수가 감소하였고, 최대 스윙 수

가 나타나는 범위가 흡출관의 중심 인근에서 벽면으로 이동하는 특성을 확인하였다. 이와 같은 결과를 토대로, 수행된 프란시스 수차 모델의 흡출관 내 와류 억제를 위한 관찰된 공기 주입 유량 중 효과가 명확히 나타난 0.5%Q 및 1.0%Q 중, 상대적으로 작은 주입 유량으로 효과를 나타낼 수 있는 0.5%Q를 주입 유량으로 선정하였으며, 해당 경계조건으로 비정상 상태 수치해석을 수행하여 내부 유동의 정밀 분석 및 비정상 압력 맥동 특성 검토를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 211FIP-B128593-05).

## References

- (1) 편집부, 2018, 신재생에너지 산업분야별 국내외 이슈분석과 핵심사업 시장전망 2018, 미래산업리서치.
- (2) 장희선, 조주현, 2018, 에너지전환시대 재생에너지 발전비중 확대에 따른 유연성 설비의 경제성 분석, 에너지경제연구원.
- (3) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., Hyun, J. J., Joo, W. G., and Kim, J. H., 2020, "Effect of Fins on the Internal Flow Characteristics in the Draft Tube of a Francis Turbine Model," *Energies*, Vol. 13, No. 11, p. 2806.
- (4) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., and Kim, J. H., 2019, "Numerical Analysis of Inter-Blade Vortex Characteristics of a Francis Hydro Turbine Model," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 22, No. 2, pp. 30~37.
- (5) Arpe, J., Nicolet, C., and Avellan, F., 2009, "Experimental evidence of hydroacoustic pressure waves in a Francis turbine elbow draft tube for low discharge conditions," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 131, No. 8, pp. 081102~081109.
- (6) Chirkov, D. V., Shcherbakov, P. K., Cherny, S. G., Skorospelov, V. A., and Turuk, P. A., 2017, "Numerical investigation of the air injection effect on the cavitating flow in Francis hydro turbine," *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 24, No. 5, pp. 691~703.
- (7) Yu, A., Luo, X. W., and Ji, B., 2015, "Numerical simulation and analysis of the internal flow in a Francis turbine with air admission," In *IOP conference series: materials science and engineering*, Vol. 72, No. 4, p. 042047.
- (8) Li, W. F., Feng, J. J., Wu, H., Lu, J. L., Liao, W. L., and Luo, X. Q., 2015, "Numerical Investigation of Pressure Fluctuation Reducing in Draft Tube of Francis Turbines,"

- International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 202~208.
- (9) IEC 60193 Ed. 2.0 b: 1999, "Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines Model Acceptance Tests," American National Standards Institute (ANSI), New York.
- (10) ANSYS CFX-19.1, 2019, ANSYS CFX Manager User's Guide, Ansys Inc.
- (11) Kim, S. J., Choi, Y. S., Cho, Y., Choi, J. W., Hyun, J. J., Joo, W. G., and Kim, J. H., 2020, "Analysis of the Numerical Grids of a Francis Turbine Model through Grid Convergence Index Method," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 23, No. 2, pp. 16~22.
- (12) Richardson, L. F., 1911, "The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Vol. 210, pp. 307~357.
- (13) Richardson, L. F. and Gaunt, J. A., 1927, "The deferred approach to the limit," Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, Vol. 226, pp. 299~361.
- (14) Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. and Raad, P. E., 2008, "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD Applications," ASME J. Fluids Eng., Vol. 130, p.078001 (4 pages).
- (15) Menter, F. R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (16) Bardina, J., Huang, P., Coakley, T., Bardina, J., Huang, P. and Coakley, T., 1997, "Turbulence modeling validation," In 28th Fluid dynamics conference, p. 2121.
- (17) 김선우, 김진훈, 현정재, 오윤령, 권영호, 최종웅, 2020, "중규모급 수력플랜트의 모델수차 성능시험 정밀시험 및 효율시험법 연구," 2020년도 한국유체기계학회 동계학술대회, KSFJ2020-20808.